

AC/DC 混合输电系统分散协调控制

李国栋, 毛承雄, 陆继明, 胡兆庆

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

DECENTRALIZED COORDINATED CONTROL OF THE AC/DC HYBRID TRANSMISSION SYSTEM

LI Guo-dong, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, HU Zhao-qing

(College of Electric and Electronics Engineering of HuaZhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Considering the AC/DC hybrid transmission system's coordinated control caused by the voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) application, the mathematic model of AC/DC hybrid system is built. One new type of decentralized coordinated optimal control mode of AC/DC hybrid transmission system is proposed, in which the Inverse System Theory is used in the control strategy of VSC-HVDC. For the matching with the traditional AC net, per unit form of mode is introduced to the VSC-HVDC in this paper. The method of Lyapunov is used to prove the stability for the close-loop nonlinear system. The numerical simulations results of the AC/DC hybrid transmission system show the efficiency and robust of the proposed control scheme.

KEY WORDS: Power system; AC/DC hybrid transmission; Voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC); Decentralized coordinated control; Inverse System Theory; Method of Lyapunov

摘要: 针对电压源型高压直流输电 (VSC-HVDC) 在应用中带来的 AC/DC 交直流输电系统的协调控制问题, 建立了 AC/DC 数学模型, 并对 AC/DC 提出了一种新的分散最优协调控制模式。在该模式中, 逆系统线性化理论被应用于直流输电系统的控制。文中为了与交流电网相配合, 将标么制引入了直流输电系统, 并以 Lyapunov 间接法证明了该闭环非线性系统的稳定性。AC/DC 混合输电系统的数值仿真结果表明了该控制策略的有效性和鲁棒性。

关键词: 电力系统; 交直流混合输电; 电压源型高压直流输电 (VSC-HVDC); 分散协调控制; 逆系统理论; 李亚普诺夫法

基金项目: 教育部优秀青年教师基金项目; 新世纪优秀人才支持计划项目。

1 引言

电压源型高压直流输电 (VSC-HVDC) 采用全控开关器件, 使其不存在传统直流输电^[1]中由于系统电压过低而导致的电流换相失败的缺点, 并使换流站具有可方便地调整功率因数、潮流等优点。然而, 由此也带来了 AC/DC 混合输电系统的控制问题。

AC/DC 混合输电系统的控制方式可分为集中协调控制^[2]和分散协调控制, 在集中协调控制中, 发电机的励磁调节器与直流输电控制器均需要实时采集所有的状态量 (例如直流电压、直流电流、发电机端电压、发电机功角、发电机转速等), 极大地提高了对通信的要求, 而且当发电机与直流输电站距离较远或发电机的数量增多时, 集中控制方式难以实现。此外, 集中式协调控制不利于系统的改造。本文将通过分析其拓扑结构图, 试图寻找一种分散最优控制模式, 使发电机与直流输电能分别独立控制; 同时为了分析方便及与交流输电系统相一致, 引入了直流输电标么制。

直流输电系统是一个非线性系统, 如果在运行点处对系统线性化则难以保证系统在其它工况下较好的动态响应特性; 而如果应用微分几何法将系统大范围线性化^[3-4], 亦很难找到相应的微分同胚量。本文在建立电压源换流站模型的基础上, 采用逆系统方式对 HVDC 进行线性化处理, 并寻求合适的反馈量, 使得系统在各种扰动中均具有较好的动态特性。

2 AC/DC 交直流混合输电系统模型

2.1 模型简介

AC/DC 交直流混合输电系统模型如图 1 所示, 图中, V_T 为发电机机端电压, P_e 为发电机输出功率, P_1 为整流站的输入功率, P_{AC} 为交流输电线路的传输功率, P_2 为逆变站的输出功率, X_T 为发电机出口端变压器等值电抗, L_1 、 L_2 、 L_3 分别为直流输电系统的等效电感, L_4 为交流单回输电线路的等效电感, C_1 、 C_2 为直流输电电容, R 为直流线路等效电阻, U_{rabc} 为整流侧三相交流电压, U_{iabc} 为逆变侧三相交流电压, U_{C1} 、 U_{C2} 分别为整流侧和逆变侧的直流电压, U_{Sabc} 为无穷大系统电压。

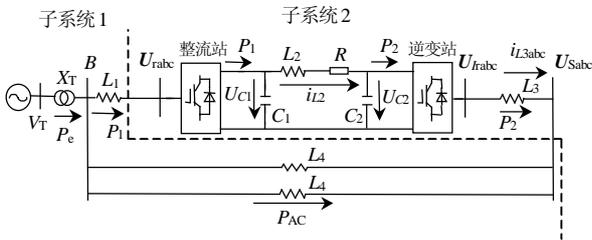


图 1 交直流混合输电系统
Fig. 1 AC/DC transmission syst

因发电机是一个有惯性的机电转换系统, 而 VSC-HVDC 相对于发电机来说, 几乎是没惯性的, 所以, 整流侧交流电压相对于发电机的惯性时间常数来说, 是可以瞬时改变的, 即通过调节换流站的调制比和调制角, 在直流电压允许的范围内, 可以维持换流站交流输出电压的相角和幅值恒定。如果在动态过程中图 1 所示的系统能保持整流侧的交流电压及相位为所需的设定值, AC/DC 混合输电系统就可以划分为 2 个相互独立的子系统, 相应地也可以期望设计出相互独立的控制器, 以减小 2 个子系统之间的通信量。此时只需调节整流侧交流电压幅值或相角, 就可分配直流输电线路与交流输电线路的功率传输, 使得输电线路的运行更加灵活、方便。

2.2 AC/DC 交直流混合输电系统数学模型

图 1 中子系统 1 可等效为图 2 所示, 并且有

$$\begin{cases} X_{\Sigma} = X_1 X_4 / (2X_1 + X_4) \\ U_{\Sigma} = (X_4 U_{rabc} + 2X_1 U_{Sabc}) / (2X_1 + X_4) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 当 AC/DC 交直流混合输电系统划分为 2 个子系统后, 其中子系统 1 可以等效为单机无穷大模型。为简便起见, 发电机采用三阶模型, 假定输入发电机的机械功率在暂态过程中保持不变, 不考虑阻尼绕组和励磁设备的动态过程, 则发电机的状态方程可表示为^[5]

$$\begin{cases} \dot{d} = w - w_0 \\ \dot{w} = w_0 (P_m - P_e) / H \\ \dot{E}'_q = (E_f - E_q) / T'_{d0} \end{cases} \quad (2)$$

式中 d 为功角; w 为角速度; w_0 为同步角速度; P_m 为输入机械功率; P_e 为电磁功率; H 为惯性时间常数; E'_q 为暂态电势; E_f 为励磁电压; E_q 为空载电势; T'_{d0} 为励磁绕组暂态时间常数。

考虑到 d 、 E'_q 的不易测量, 且有

$$P_e = \frac{E'_q V_{\Sigma} \sin d}{X'_{d\Sigma}} + \frac{V_{\Sigma}^2 (x'_d - x_q) \sin 2d}{2X'_{d\Sigma} X'_{q\Sigma}} \quad (3)$$

式中 x'_d 、 x_q 分别为发电机的 d 轴暂态电抗和 q 轴电抗; $X'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + X_{\Sigma}$; $X'_{q\Sigma} = x_q + x_T + X_{\Sigma}$ 。

故可采用 $[P_e \ w \ V_i]^T$ 为状态反馈量, 将方程偏差化后, 得发电机状态方程^[6]为

$$\begin{cases} \Delta \dot{P}_e = K_1 \Delta P_e + K_2 \Delta w + K_3 \Delta V_i + K_4 \Delta E_f \\ \Delta \dot{w} = K_5 \Delta P_e \\ \Delta \dot{V}_i = K_6 \Delta P_e + K_7 \Delta w + K_8 \Delta V_i + K_9 \Delta E_f \end{cases} \quad (4)$$

由上面的分析可以看出, 在动态或者稳态过程中, 当 AC/DC 混合输电系统整流侧交流电压的相角及相位保持为所需的设定值不变时, 发电机的模型与单机一无穷大系统是一致的, 发电机励磁调节器的设计可以不考虑直流输电线路的影响。因此可以分别对发电机和直流输电加以控制, 达到相互独立的目的, 以利于输电电网的灵活改造。

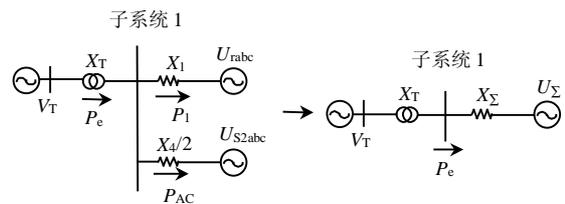


图 2 子系统 1 等效电路图
Fig. 2 The equivalent circuit of sub-system 1

子系统 2 由整流站、直流输电线路、逆变站组成, 由功率平衡有

$$P_e = P_1 + P_{AC} \quad (5)$$

当保持整流侧交流电压相角及相位不变时, 整流站相当于无穷大交流系统, 当同步发电机忽略定子暂态时, 定子绕组所连接的交流网络一般也忽略暂态, 并用准稳态模型描述。因此, 本文中发电机侧换流站交流部分采用准稳态模型。又由于直流输电线路以及逆变侧换流站的瞬时过压、过流等问题的存在不容忽视, 所以直流输电线路以及逆变侧换流站采用暂态模型。如果只考虑基波成分, 并采用 PWM

方式进行整流逆变, 则可得

$$\begin{cases} U_{\text{labc}} = L_3 \frac{di_{L3\text{abc}}}{dt} + U_{\text{Sabc}} \\ U_{C1} - U_{C2} = Ri_{L2} + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \\ P_1 = P_1' \\ P_2 = P_2' \end{cases} \quad (6)$$

设 m_1 、 m_2 分别为整流侧、逆变侧的调制比; f_1 、 f_2 为整流侧、逆变侧载波的相角; a 为 U_{Sabc} 的相角, 则^[7]

$$\begin{cases} U_{ra} = \frac{U_{C1}}{2} m_1 \sin(\omega t + f_1) \\ U_{rb} = \frac{U_{C1}}{2} m_1 \sin(\omega t + f_1 - \frac{2\pi}{3}) \\ U_{rc} = \frac{U_{C1}}{2} m_1 \sin(\omega t + f_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ U_{la} = \frac{U_{C2}}{2} m_2 \sin(\omega t + f_2) \\ U_{lb} = \frac{U_{C2}}{2} m_2 \sin(\omega t + f_2 - \frac{2\pi}{3}) \\ U_{lc} = \frac{U_{C2}}{2} m_2 \sin(\omega t + f_2 + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

为了分析方便, 假设逆变器的输出三相对称, 则可对逆变侧的状态方程做相应的 dq 变换, 变换矩阵 p 为

$$p = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\omega t + a) & \cos(\omega t + a - 2\pi/3) & \cos(\omega t + a + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + a) & \sin(\omega t + a - 2\pi/3) & \sin(\omega t + a + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

则对子系统 2 可用微分代数方程组表示^[4-6]为

$$\begin{cases} \frac{di_{L2}}{dt} = -\frac{Ri_{L2}}{L_2} + \frac{(U_{C1} - U_{C2})}{L_2} \\ \frac{di_{L3d}}{dt} = -\omega i_{L3q} + \frac{u_{ld}}{L_3} - \frac{U_s}{L_3} \\ \frac{di_{L3q}}{dt} = \omega i_{L3d} + \frac{u_{lq}}{L_3} \\ \frac{dU_{C1}}{dt} = -\frac{i_{L2}}{C_1} + \frac{P_1}{C_1 U_{C1}} \\ \frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{i_{L2}}{C_2} - \frac{3(u_{ld}i_{L3d} + u_{lq}i_{L3q})}{2C_2 U_{C2}} \\ u_{ld} = \frac{U_{C2}m_2 \sin(f_2 - a_2)}{2} \\ u_{lq} = \frac{U_{C2}m_2 \cos(f_2 - a_2)}{2} \\ Q_1 = -\frac{3}{2}|U_s|i_{L3q} \end{cases} \quad (9)$$

式中 i_{L3d} 、 i_{L3q} 分别为电网侧换流站交流部分 d 轴

与 q 轴电流分量; U_{ld} 、 U_{lq} 分别为电网侧换流站交流部分 d 轴与 q 轴电压分量。

若将 U_{ld} 、 U_{lq} 看作直流输电系统虚拟输入控制量, 则可得由式(4)、(9)所表示的交直流混合输电系统的数学模型。

从式(7)可以看出: 通过改变 m_1 、 f_1 可控制整流侧交流电压幅值及相角; 从式(9)得知, 逆变站的无功是 i_{L3q} 的线性函数, 因此, 通过调节 m_1 、 f_1 和 i_{L3q} , 可以分配交直流输电功率传输任务以及控制逆变站的输出无功功率。

2.3 模型的标么化

目前对换流站的研究仍然采用有名值^[8-10], 而交流电力系统网络参数通常采用标么值来表示, 为了与交流电力系统相融合, 有必要将直流输电系统标么化。与交流电力网络基值选取原则一致, 标么值模型应该与有名值模型的数学表达式一致。由此, 可对直流输电系统选取基值为

$$\begin{cases} U_{CB} = U_{C1N} \\ i_{LB} = S_B / U_{CB} \\ C_B = i_{LB} / U_{CB} \\ L_{2B} = R_B = U_{CB} / i_{LB} \end{cases} \quad (10)$$

式中 U_{CB} 、 i_{LB} 、 C_B 、 L_{2B} 、 R_B 、 U_{C1N} 、 S_B 分别为直流电压、直流滤波电容、直流输电线路电感、电阻、整流侧直流电压的额定值及发电机额定容量。

由式(10)可以得到与式(9)的表达形式相同的标么化直流输电数学模型(在此不再重写), 这样就可以有效地将交流、直流输电系统在数学模型上用标么值统一起来。

3 控制器的设计

3.1 设计思路

为了实现分散控制的目的, 本文将对发电机(子系统 1)和直流输电站(子系统 2)分别设计相互独立的控制器^[11-13]。发电机励磁目前主要有 PID+PSS、线性最优及非线性等种类的调节器^[14-15], 本文直接使用现有的线性最优励磁调节器作为子系统 I 的控制器。

由式(9)可以看出, 子系统 2 是一个非线性系统, 如果对模型在某个特定的运行点线性化, 则难以得到理想的全局动态响应特性。本文尝试用逆系统线性化方式对其进行全局线性化, 以期直流输电系统有较好的输出特性。

3.2 逆系统线性化理论

假设有一多输入、多输出非线性系统

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \\ y = x \end{cases} \quad (11)$$

式中 x 为状态量; u 为实际控制量; t 为时间。为了能有效地控制输出 y , 可先对 y 求导, 得

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} = f(x, u, t) = v \\ u = f^{-1}(x, v, t) \end{cases} \quad (12)$$

式中 v 为虚拟控制量。

经以上处理就将非线性系统强制转换为式(12)所示的线性系统^[6], 以此即可采用线性系统的各种控制理论(本文采用最优控制方式)对其进行控制。

3.3 逆系统线性化理论在直流输电系统中的应用

式(9)所示的直流输电系统, 其控制系统的有功及无功输出即为控制 i_{L2} 、 U_{C1} 、 U_{C2} 、 i_{L3d} 、 i_{L3q} 的值, 而系统只有4个控制量 m_1 、 f_1 、 m_2 、 f_2 , 其中整流站的控制量 m_1 、 f_1 用于保证 U_{rabc} 的幅值和相角, 所以应合理地选取逆变侧输出反馈量以保证系统的稳定。

本文选择反馈量为

$$Y = (i_{L3q}, i_{L2})^T \quad (13)$$

根据逆系统线性化理论^[13], 先对式(13)求导可得

$$\begin{cases} \frac{di_{L2}}{dt} = -\frac{Ri_{L2}}{L_2} + \frac{(U_{C1} - U_{C2})}{L_2} = V_0 \\ \frac{di_{L3q}}{dt} = \omega i_{L3d} + \frac{u_{Lq}}{L_3} = V_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中 V_0 为虚拟状态量; V_1 是虚拟控制量。

经过一次求导后出现了控制量 U_{Lq} , 为了得到另一控制量, 需对 i_{L2} 二次求导, 得到

$$\frac{d^2 i_{L2}}{dt^2} = -R \frac{di_{L2}}{L_2 dt} + \left(\frac{dU_{C1}}{dt} - \frac{dU_{C2}}{dt} \right) / L_2 = V_2 \quad (15)$$

式中 V_2 为虚拟控制量。

由式(9)知式(15)中显含 U_{Ld} 。将式(14)、(15)联立, 可得

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{L3q}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \frac{dV_0}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L3q} \\ i_{L2} \\ V_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

如果采用最优控制, 根据式(14)~(16)及 Riccati 方程 $-PA - A^T P + PBQ_2^{-1} B^T P - Q_1 = 0$ 得虚拟控制

解, 进一步可得

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ U_{Lq} \\ U_{Ld} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I_1 \Delta i_{L2} - I_2 \Delta V_0 \\ -I_3 L_3 \Delta i_{L3q} + \omega_0 i_{L3d} \\ (L_2 C_2 U_{C2} V_2 + C_2 R U_{C2} V_0 + U_{C2} i_{L2} C_2 / C_1 \\ -P C_2 U_{C2} / (C_1 U_{C1}) + U_{C2} i_{L2} - U_{Lq} i_{L3q} / i_{L3d} \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中 I_1 、 I_2 、 I_3 均为大于0的正值。

至此, 逆变站的2个虚拟输入量 U_{Ld} 、 U_{Lq} 已经全部得到。根据式(9)中的代数方程, 可以得到逆变侧实际控制量 $m_2 = 2\sqrt{(U_{Ld}^2 + U_{Lq}^2) / U_{C2}^2}$, 进而求出实际控制量 f_2 。

由上所述可以看出, 本文选择 i_{L3q} 、 i_{L2} 为输出反馈量, 得到了相应的控制规律。而在这种控制规律的作用下, 有必要分析系统是否稳定。

3.4 直流子系统镇定性分析

设 $X = (i_{L3q}, i_{L2}, U_{C1}, U_{C2}, i_{L3d})^T$, $f(X) = (i_{L3q}, i_{L2}, \dot{U}_{C1}, \dot{U}_{C2}, i_{L3d})^T$, 由式(16)和(9)可得 $f(X)$ 的 Jacobi 矩阵为

$$\begin{pmatrix} -I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & \frac{-I_2 \pm \sqrt{I_2^2 - 4I_1}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \frac{-P_1}{C_1 U_{C1}^2} & 0 & 0 \\ * & * & * & \frac{-I_2}{L_2} & 0 \\ * & * & * & * & \frac{-P_2}{i_{L3d}^2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中 * 是与 Jacobi 矩阵特征根无关的数值, Jacobi 矩阵的特征根即为矩阵的对角线元素。

从式(18)可知, 由于 I_1 、 I_2 、 I_3 均为大于0的正值, 则特征根位于左半平面, 直流子系统在本文所提出的控制规律的作用下, 是一个稳定的系统。

4 系统仿真

4.1 仿真条件

本文针对图1所示的拓扑结构, 选取如表1所示的系统参数进行了数值仿真。为分析简便, 设定扰动前 U_{rabc} 的幅值和相位与 U_{Sabc} 相等。

表1 系统参数

Tab.1 Parameters of the system		pu								
系统参数	x_d	x'_d	x_q	T'_{d0}	H	x_r	x_1	x_2	x_3	
数值	0.9037	0.3582	0.6397	5.53	7.7106	0.15	0.15	0.02	0.1	
系统参数	x_4	$\cos f$	P_m	P_r	u_r	U_S	U_{C1}	C_1	C_2	
数值	0.075	0.8	1	0.5	0.8	0.8	2.5	0.008	0.008	

4.2 B 母线三相短路

假定 B 母线发生三相短路, 10ms 后故障解除, 仿真结果如图 3 所示。从仿真结果可以看出, 故障解除后, 在本文所提出的控制规律作用下, 发电机功率、交流传输功率、发电机出口电压、直流母线电压及发电机的功角等迅速地恢复到故障前的稳态值。

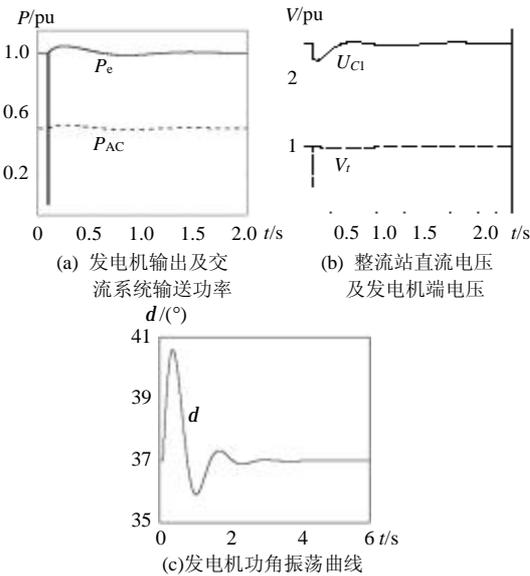


图 3 B 母线三相短路

Fig. 3 Three phases short circuit of bus B

4.3 交流输电线路单回线断路

假设交流双回输电线路有一回断开, 仿真结果如图 4 所示。交流输电线路单回断开时, 相当于系

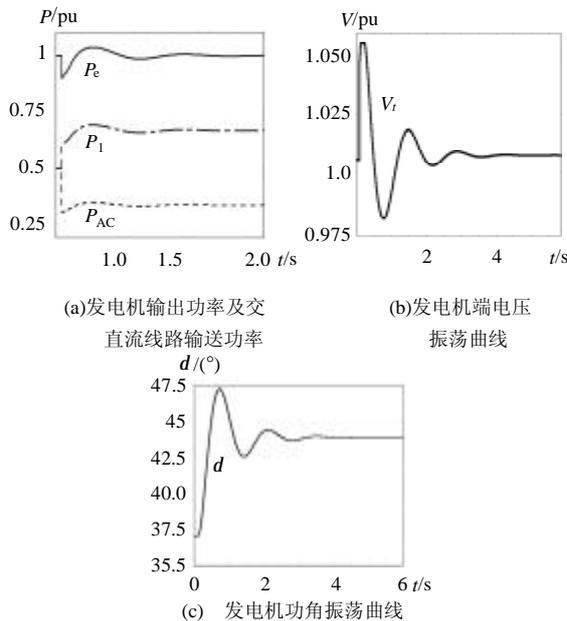


图 4 交流输电线路单回线断路仿真结果曲线

Fig. 4 Single line open circuit of AC transmission line

统阻抗 X_2 增大。如果此时发电机输出功率不变, 则在所提出的控制规律作用下, 发电机的功角将会增大, 如图 4(c) 所示, 此时母线 B 相对于无穷大母线的功角也将变大。由于 U_{rabc} 的幅值和相位与 U_{Sabc} 相等且保持不变, 所以单回线跳开后, 直流输电线路传输的功率大于单回线跳开前的值。虽然此时单根交流输电线路的传输功率会有所增加, 但总的交流输电线路功率 P_{AC} 会有所下降, 如图 4(a) 所示。由图中可以看出: 发电机机端电压、发电机输出功率以及发电机功角在较短的时间内很快地恢复到扰动前的稳态值。

4.4 发电机功率阶跃 5%

发电机功率阶跃 5% 的仿真结果如图 5 所示。直流输电部分的控制器保持直流母线电流不变, 如果发电机机械输入功率增加, 则直流母线电压会有所上升, 如图 5(a) 所示。从图 5(a) 中可以看出: 在本文所提出的控制策略作用下, 分散模式控制器使得发电机的输出功率及直流输电系统的传输功率均迅速地过渡到所期望的稳态值。

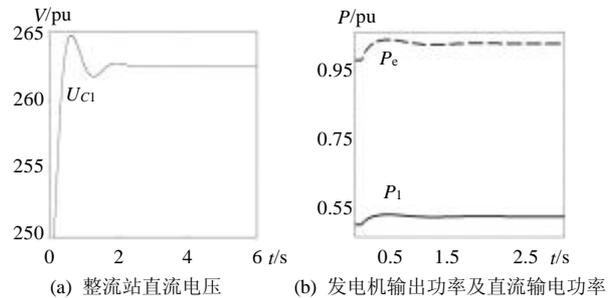


图 5 发电机功率阶跃 5% 的仿真结果

Fig. 5 The active power of generator increases 5%

5 结论

本文在分析交直流混合输电系统拓扑结构及运行的基础上, 提出了一种新型的分散式控制思想, 根据这种控制思想, 建立了相应的数学模型。通过适当地设计发电机的励磁调节器和直流输电换流站的控制器, 使图 1 所示的系统可以各自独立地控制其发电机与直流输电的换流站。文中还将逆系统线性化理论应用到直流输电非线性控制器的设计中, 从而保证了较大范围内的动态响应特性。仿真结果表明, 在本文所提出的控制规律作用下, AC/DC 混合输电系统有较好的动态响应特性。

参考文献

[1] 吴红斌, 丁明, 李生虎. 直流输电模型和调节方式对暂态稳定影响的统计研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 33-37.

- Wu Hongbin, Ding Ming, Li Shenghu. Statistical research on the effects of HVDC models and controls to transient stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 33-37.
- [2] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 一种优化控制策略在基于电压源换流器的 HVDC 系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 38-41
- Hu Zhaoqing, Mao Chengxiong, Lu Jimin. Application of an optimal control strategy to a new type of HVDC system based on voltage source converters[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 38-41.
- [3] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.
- [4] 邓卫华, 张波, 胡宗波. CCM Buck 变换器的状态反馈精确线性化的非线性解耦控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 120-125.
- Deng Weihua, Zhang Bo, Hu Zongbo. Research of nonlinear coupled control law using state variable feedback linearization method based on the CCM buck converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 120-125.
- [5] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 范澍, 毛承雄, 陆继明, 等. 多机电力系统神经网络最优励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 80-84.
- Fan Shu, Mao Chengxiong, Lu Jiming *et al.* Neural network based optimal excitation controller for multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 80-84.
- [7] 李锡雄, 陈婉儿. 脉宽调制技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [8] Liao JuinneChing, Yeh ShengNian. A novel Instantaneous power control strategy and analytic model for integrated rectifier/inverter systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(6): 996-1006.
- [9] Rioul P, Pouliquen H. Nonlinear control of pwm rectifier by state feedback linearization and exact PWM control[C]. Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE, 20-25 June, 1994, 2: 1095-1102.
- [10] Lu Weixing, Boon Teck Ooi. Simultaneous inter-area decoupling and local area damping by voltage source HVDC[J]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2001. 3(28): 1079-1084.
- [11] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [12] Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Control strategy for unsymmetrical operation of HVDC-VSC based on the improved instantaneous reactive power theory[C]. AC-DC Power Transmission, 28-30 November 2001 Conference Publication 485 IEE, 2001, 262-267.
- [13] José R, Espinoza, Géza Joós. State variable decoupling and power flow control in PWM current source rectifiers[J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 1998, 45(1): 78-87.
- [14] 程远楚, 漆为民, 叶鲁卿, 等. 发电机励磁的非线性解析模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 22(9): 121-125.
- Cheng Yuanchu, Qi Weiming, Ye Luqing *et al.* A nonlinear analytical fuzzy logic excitation controller of generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(9): 121-125.
- [15] 李啸霆, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003 年, 23(12): 37-42.
- Li Xiacong, Cheng Shijie, Wei Hua *et al.* A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [16] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

收稿日期: 2005-04-03。

作者简介:

李国栋 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用及电力系统运行与控制;

毛承雄 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为电力系统运行与控制;

陆继明 (1956-), 男, 副教授, 主要研究领域为电力系统运行与控制;

胡兆庆 (1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为大型同步发电机励磁控制及电力电子技术在电力系统中应用。